

Підвищення ефективності обробки складнопрофілих фасонних поверхонь на основі фрезерування з постійним зсувом ріжучої крайки

А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, Н. Ю. Ламнаер, В. М. Бурдейна

Для підвищення ефективності обробки фрезеруванням складних фасонних поверхонь (СФП), застосовуються в основному методи, пов'язані з поліпшенням властивостей інструментального матеріалу, зміною складу і властивостей поверхневого шару інструменту, нанесенням тонкоплівкових покриттів, зниженням шорсткості робочих поверхонь і поліпшенням умов експлуатації інструменту застосуванням ЗОТС.

Виходячи з вище викладеного в роботі дослідженні та викладені науково обґрунтовані технічні та технологічні рішення, які полягають в розробці нового вискоефективного способу обробки складних фасонних поверхонь дисковими радіусними фрезами зі зворотно-гойдальним рухом подачі. Даний метод обробки дозволяє підвищити період стійкості інструменту в 1,7 рази і продуктивність фрезерування в 1,6 рази, за рахунок постійного кінематичного зсуву ріжучої крайки відносно поверхні різання.

Запропоновано математичний апарат способу фрезерування з постійним зсувом ріжучої крайки. Аналіз даного методу за допомогою числових функцій, дозволив встановити аналітичні залежності для визначення товщини і об'єму одиничного зрізаного шару.

Основний вплив на величину товщини зрізаного шару надає подача на зуб S_z , а на обсяг – кут ν , що визначає нормальні умови різання. Досліджено модель розподілу теплових потоків в ріжучому клині для способу фрезерування зі зворотно-гойдальним рухом подачі, що враховує амплітуду руху, що гойдає заготовки. Встановлено зниження температури до 330,2...395,5 °С, тобто на 80,6...181,6 °С для штампової сталі 9ХС і до 193,8 ... 285 °С, тобто 56,6...120,2 °С для сталі 45, в порівнянні зі звичайним фрезеруванням. Встановлено, що загальна довжина ріжучої крайки збільшується в 2,4 рази, при цьому температура знижується в 1,5 рази

Ключові слова: фрезерування, кінематична схема різання, ріжучий інструмент, ріжуча крайка, складна фасонна поверхня, ЧПУ

1. Вступ

Кінематичні схеми обробки поверхні, конструкції різального інструменту, вихідні інструментальні поверхні безпосередньо впливають на стійкість матеріалу різального інструменту, а, отже, і на продуктивність обробки.

Так, наприклад, при обробці сталі 20Х13 твердосплавним інструментом, перехід від кінематичних схем з безперервним процесом різання (точіння різцем) до переривчастого процесу обробки (точіння фрезою) зменшує сумарний шлях інструменту до 50 разів [1–3].

Це свідчить про те, що на зношування інструмента дуже великий вплив виявляють його тип, геометрія й конструкція, спосіб врізання в заготовку, тип устаткування і т. п. Як відомо, фрези, що працюють в умовах переривчастого різання, у момент торкання із заготовкою одержують удар. При торцевому фрезеруванні із прямими зрізами чавуну [4], а також вуглецевих і малолегованих сталей, стійкість фрез виявляється більшою, коли врізання здійснюється з мінімальною товщиною зрізу (рис. 1, б).

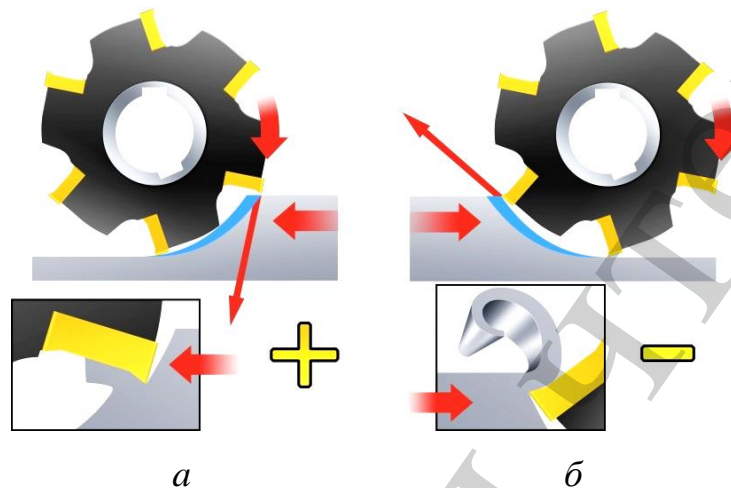


Рис. 1. Способи фрезерування, обумовлені напрямком руху заготовки щодо інструмента; а – попутне фрезерування; б – зустрічне фрезерування

При попутному фрезеруванні (рис. 1, а) умови входу пластини в зону різання більш сприятливі. Вдається уникнути високих температур у зоні різання й мінімізувати схильність матеріалу заготовки до зміцнення. Більша товщина стружки є в цьому випадку перевагою. Сили різання притискають заготовку до стола верстата, а пластини в гнізда корпуса, сприяючи їх надійному кріпленню.

Попутне фрезерування є кращим за умови, що твердість устаткування, кріплення й сам оброблюваний матеріал дозволяють застосовувати даний метод. У той же час, цей процес сполучений з певними труднощами. Сили різання прагнуть затягти фрезу на оброблюваний припуск і пригорнути заготовку. У випадку, якщо є небезпека вібрацій, попутне фрезерування більш сприятливо [5–7].

У цей час існують реальні можливості керування формуванням параметрів поверхневого шару деталі в процесі її виготовлення. Ця можливість може бути реалізована раціональним вибором методів і режимів попередньої й остаточної обробки робочих поверхонь деталі. При цьому використовують різні технологічні методи забезпечення параметрів поверхневого шару деталей з урахуванням умов їх експлуатації.

На даний момент існує безліч різних схем формоутворення фасонних поверхонь. Більшість цих схем поєднує те, що формоутворення забезпечується трьома погодженими рухами:

- обертальне (обробка дисковими інструментами);
- обертний рух оброблюваної заготовки;
- погоджене з обертним рухом поступальне переміщення заготовки або інструмента уздовж осі фасонної поверхні.

Виключення становить процес точіння фасонних поверхонь, при якому різуче лезо урізається на всю глибину профілю.

Найбільш перспективним є спосіб обробки складних фасонних поверхонь, який здійснюють дисковою фрезою з комбінованою виробляючою поверхнею. Даний метод обробки складних поверхонь дозволяє підвищити точність за рахунок обкату профілів деталі прямолінійними утворюючими інструмента, крім того, він універсальний і високопродуктивний. Недоліком даного методу є недоцільність обробки ввігнутих криволінійних профілів, тому що в роботі буде брати участь тільки невелика тороїдальна ділянка виробляючої поверхні [8].

Велика кількість застосовуваних кінематичних схем обробки фасонних поверхонь у значній мірі обумовлене різко відмінними розмірами деталей. Вибір найбільш раціонального методу обробки і його параметрів – досить складне завдання, якому не приділялося досить уваги.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогоднішній день відома безліч схем формоутворення складно-профільних фасонних, у т. ч. гвинтових поверхонь [9]. Традиційний і найпростіший метод обробки фасонної поверхні деталі й програмування траєкторії руху фрези є копіювання профілю, що супроводжується численними входами й виходами фрези з контакту із заготовкою (рис. 2).

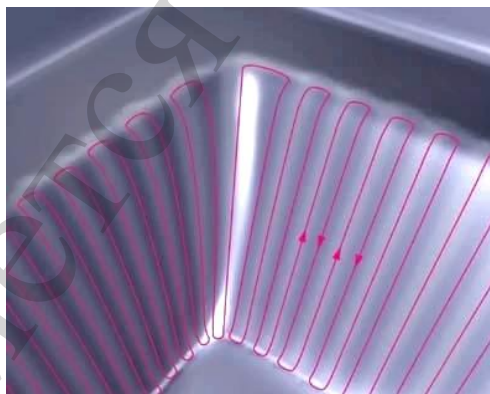


Рис. 2. Метод копіювання

Недоліком даного методу є невисока стійкість різального інструменту через виникнення високих навантажень у центрі фрези, більша тривалість циклу обробки.

Більш універсальним методом обробки фасонних поверхонь є фрезерування дисковою фрезою або різцевою головкою. Найчастіше, при фрезеруванні деяких деталей (наприклад, спіральних свердлів) кут установки фрези до осі свердла ω_1 вибирають на $1\text{--}2^\circ$ більше або менше кута підйому гвинтової лінії ω . Такий підхід забезпечує кращу якість гвинтової поверхні й

підвищує стійкість інструмента, але тільки в тому випадку, якщо виключені викривлення й підрізи профілю [10].

Трохоїдальне фрезерування може бути охарактеризоване як кругове фрезерування з одночасним лінійним переміщенням. Фреза знімає повторювані «шари» матеріалу за рахунок послідовних спіральних проходів у радіальному напрямку. У порівнянні зі стандартною обробкою канавок, трохоїдальний метод забезпечує більшу стабільність процесу, стійкість і зниження витрат на інструмент.

При фрезеруванні канавок шириною менш $2D_{\Phi}$ (рис. 3) програмується один безперервний спіральний прохід у радіальному напрямку для формування профілю. При цьому значення подачі є постійною величиною, а радіальна глибина різання – змінною. Час, який інструмент перебуває поза різанням, дорівнює 50 % від загального часу циклу.

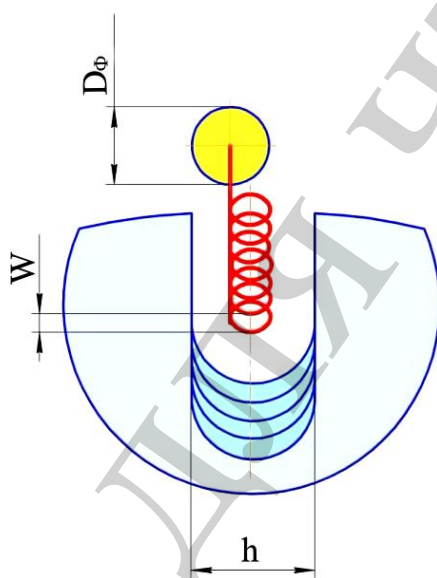


Рис. 3. Схема трохоїдального фрезерування вузької канавки

Для канавок ширше $2D_{\Phi}$ (рис. 4) спіральний прохід, аналогічний обробці вузьких канавок, при якому 50 % часу затрачається на вивід інструмента з зони різання, може бути оптимізований за рахунок збільшення ширини проходу [11].



Рис. 4. Схема трохоїдального фрезерування широкої канавки

У процесі різання робочі поверхні інструмента перебувають в екстремальних умовах тертя й зношування. Їхнє зношування обумовлене, головним чином, дією підвищених температур і контактних тисків у зоні взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом [12]. Теплові явища безпосередньо впливають на характер утворення стружки, наростоутворення, сили різання й мікроструктуру поверхневого шару. Виділення теплоти при різанні пояснюється тим, що в теплоту переходить механічна енергія, витрачена на зняття стружки. При різанні спостерігається складне переплетення теплових потоків, теплота від кожного джерела розподіляється між усіма тілами, що беруть участь у процесі різання (стружка, заготовка, інструмент) [13].

Найбільш сильний вплив на температуру виявляє швидкість різання, при цьому зі збільшенням швидкості температура спочатку швидко зростає і далі асимптотично прагне до граничного значення, яке приблизно дорівнює температурі плавлення оброблюваного матеріалу.

В умовах переривчастого різання, різання зі змінною ріжучою крайкою, короткочасного й періодичного різання, величини теплових потоків і температура різання змінюються в часі, тобто має місце несталий теплообмін (рис. 5, 6). У результаті цього температура різання залежить не тільки від режимів обробки й фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, але й від умов охолодження під час холостого пробігу [14, 15].

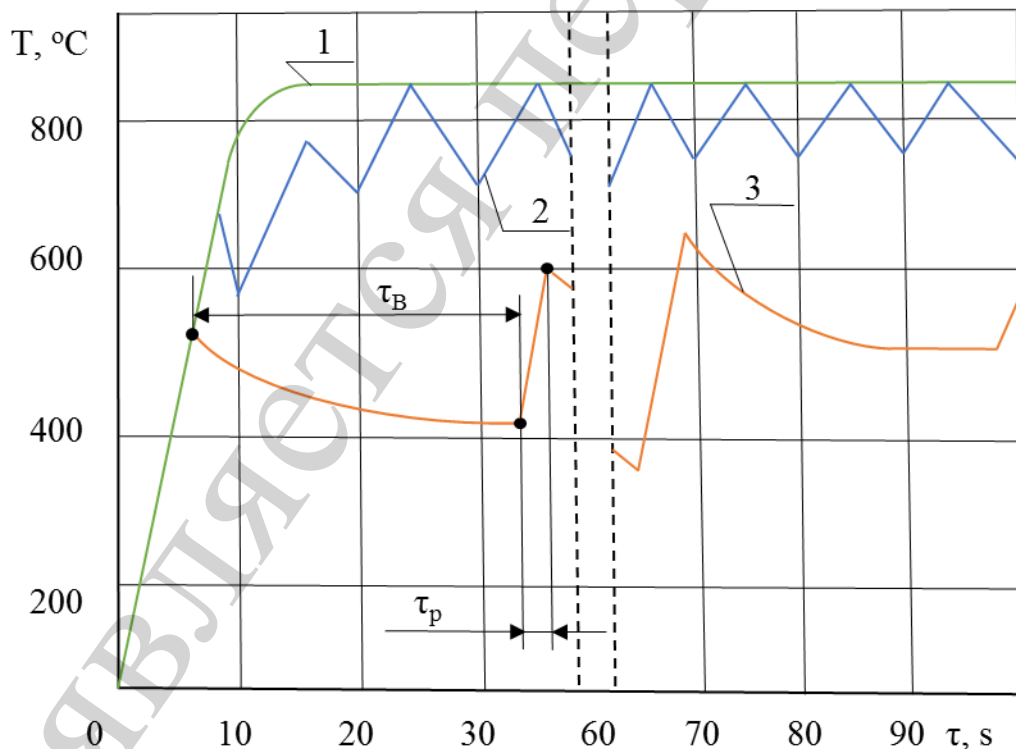


Рис. 5. Зміна температури ріжучої крайки інструмента із твердого сплаву Т14К8 залежно від режимів теплообміну: 1 – встановленою; 2, 3 – несталою

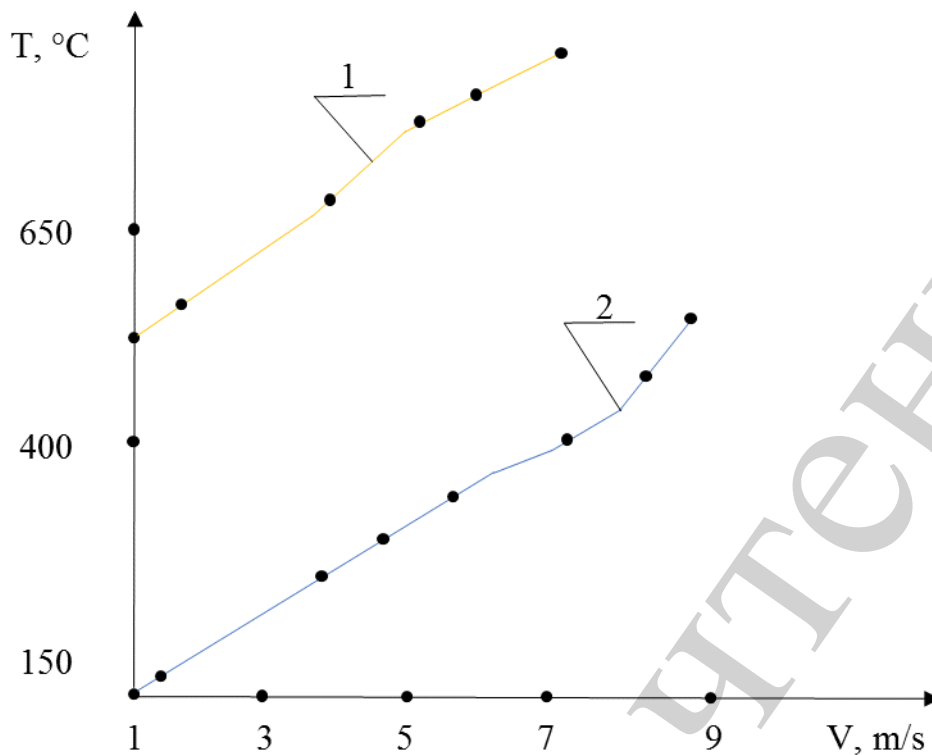


Рис. 6. Залежність температури різця з T15 K6 від швидкості різання:
1 – призматичного; 2 – ротаційного

Зниженням температури в зоні різання за рахунок зміни кінематики руху різального інструменту можна добитися підвищення стійкості інструмента.

Товста стружка на виході приводить до зниження терміну служби інструмента й може викликати його різке руйнування. Можна помітити, що якщо програма передбачає врізання в заготовку по прямої лінії, товста стружка утворюється, поки фреза повністю не ввійде в деталь. У результаті ресурс інструмента інтенсивно знижується, і для забезпечення прийнятної терміну служби необхідно буде знизити швидкість подачі для всього процесу (рис. 7, б).

Існує два способи розв'язку цієї розповсюджені проблеми, що дозволяють застосовувати оптимальну швидкість подачі в період врізання фрези в заготовку:

- програмування на врізання по прямій, але зі зниженої на 50 % швидкістю подачі, поки фреза повністю не ввійде в заготовку;
- врізання по кривій з обертанням за годинниковою стрілкою (обертання проти годинникової стрілки не допомагає розв'язати проблему утвору товстої стружки) (рис. 7, а).

Можна помітити, що при врізанні по криволінійній траєкторії товщина стружки на виході завжди нульова, це дозволяє застосовувати високу швидкість подачі й збільшує термін служби інструмента.

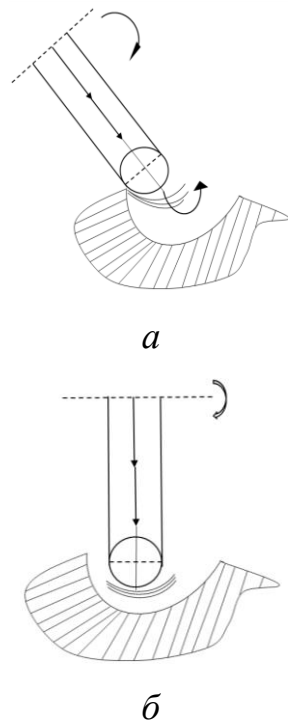


Рис. 7. Траєкторія врізання фрези в заготовку: *а* – врізання фрези по криволінійній траєкторії, *б* – врізання всією фрезою по прямолінійній траєкторії

Аналіз існуючих способів обробки складнопрофільних фасонних поверхонь лезвійним інструментом свідчить про те, що зношування пластини сконцентроване переважно на її вершині. Для більш рівномірного зношування ріжучої пластини інструменту надають рух обкату ріжучої крайки по оброблюваній поверхні. Ці методи є маловивченими. До них відносяться методи лінійного або нелінійного обкату, при яких виробляюча поверхня інструмента перекочується по номінальній поверхні деталі. Передбачається, що зсув ріжучої крайки й періодична заміна ділянок головної ріжучої крайки на допоміжну й навпаки повинні значно підвищити стійкість інструмента.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є визначення шляхів підвищення зносостійкості інструменту та продуктивності при фрезеруванні складно профільних фасонних поверхонь за рахунок постійного зсуву ріжучої крайки відносно поверхні різання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити новий спосіб фрезерування складнопрофільних фасонних поверхонь з кінематичною схемою, що забезпечує постійний зсув ріжучої крайки відносно поверхні різання;
- розробити алгоритм розрахунку траєкторії руху інструменту при фрезеруванні з постійним зміщенням ріжучої крайки щодо поверхні різання.

4. Методи дослідження процесу обробки фасонних поверхонь на основі фрезерування з гойдаючим рухом подачі

З метою визначення основних раціональних технологічних параметрів обробки при фрезеруванні з гойдаючим рухом подачі, необхідно визначити залежності між узгоджуваними рухами.

За один оберт інструмента навколо осі OZ ріжуча крайка переміщується на кут φ_Z , який дорівнює 2π радіан, за цей же час τ інструмент навколо осі OY повертається на кут φ_Y , виражений у радіанах, обумовлений по формулі:

$$\varphi_Y = \frac{Z \times S_3 \times p}{\frac{D}{2} - r}, \quad (1)$$

де Z – число зубів інструмента; S_3 – подача на зуб інструмента, мм/зуб; p – коефіцієнт ковзання; D – діаметр інструмента, мм; r – радіус тороїдальної виробляючої поверхні, мм.

Подача інструмента визначається по формулі:

$$S_0 = \frac{S_{Y_0} + S_{Z_0} + S_{KP}}{n_p}, \quad (2)$$

де S_0 – технологічно задана подача на оберт інструмента, мм/об; S_{Y_0} – подача на оберт інструмента уздовж осі OY , мм/об; S_{Z_0} – подача на оберт інструмента уздовж осі OZ , мм/об; S_{KP} – кругова подача заготовки, мм/об; n_p – число обертів інструмента, хв^{-1} .

$$S_{KP} = \pi \times D_3 \times n_3, \quad (3)$$

де D_3 – діаметр оброблюваної заготовки, мм; n_3 – число обертів заготовки, хв^{-1} .

Подачі інструмента уздовж SY і поперек SZ оброблюваного профілю (рис. 8) для ввігнутої дугоподібної ділянки поверхні при повороті заготовки на кут ψ визначаються по формулах:

$$\begin{cases} S_{Z_0} = p \times z \times (R_A + r_0) \times \cos \psi_i \\ S_{Y_0} = p \times z \times (R_A + r_0) \times \sin \psi_i \end{cases} \quad (4)$$

де R_A – радіус деталі в крапці A (рис. 8), r_0 – радіус тороїдальної виробляючої поверхні інструмента, p – коефіцієнт ковзання.

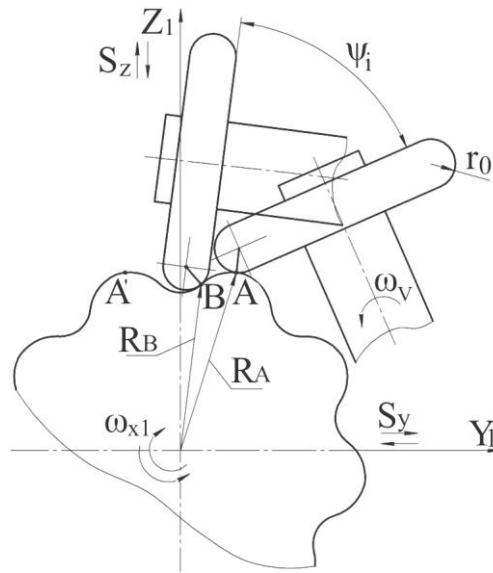


Рис. 8. Схема нелінійного обкату складного профілю деталі

Швидкості рухів формоутворення відповідно, будучи першими похідними переміщення за часом $V = \frac{d_s}{d_t}$, визначаються по формулах:

$$\begin{cases} \omega_{x1} = \frac{\psi}{t}, \\ V_{SZ} = p \times (R_A + r_0) \times \omega_{x1} \times \sin(\omega_{x1} \times t), \\ V_{SY} = p \times (R_A + r_0) \times \omega_{x1} \times \cos(\omega_{x1} \times t). \end{cases} \quad (5)$$

Встановлення функціонального взаємозв'язку між окремими рухами формоутворення зводиться до встановлення переміщень деякої крапки ріжучої крайки інструмента ΔSZ , ΔSY у збільшеннях залежно від кута повороту заготовки ψ_i .

Причому, ці переміщення повинні відбуватися таким чином, щоб дотична в деякій крапці профілю інструмента збігалася з дотичної до оброблюваної сторони профілю деталі.

4. 1. Моделювання траєкторії руху інструмента

Для деяких функцій визначення похідної досить важка задача, у цьому випадку визначається кут нахилу, наближений до дотичної у крапці M_1 , по формулі:

$$\alpha = \arctg \frac{Z_2 - Z}{Y_2 - Y}, \quad (6)$$

де Y_2, Z_2 – координати наступної за M_1 крапки при обході деталі по профілю; Y, Z – координати попередньої крапки при обході деталі по профілю.

Здійснюється перевірка функції на точність обробки профілю, тобто на точність збігу наближеної дотичній з дійсною в крапці M_1 .

Для цього визначаються знаки логічної формули деталі для двох точок, розташованих на наближеній дотичній із двох сторін від крапки M_1 , на рівній відстані Δt від неї.

Величина Δt визначається точністю обробки профілю $\Delta T \approx \frac{S}{2}$, де S – розмір кроку растрової сітки.

Координати перевірочних точок, розташованих на дотичній, визначаються по формулах:

$$\begin{cases} Z_{T1} = Z_1 + \Delta T \cos \alpha, \\ Y_{T1} = Y_1 + \Delta T \sin \alpha, \end{cases}$$
$$\begin{cases} Z_{T2} = Z_1 - \Delta T \cos \alpha, \\ Y_{T2} = Y_1 - \Delta T \sin \alpha, \end{cases} \quad (7)$$

Координати перевірочних точок підставляються в логічну формулу деталі. У тому випадку якщо обидва значення мають однаковий знак або дорівнюють нулю, то це цілком задовольняє умови точності. Так наприклад, якщо обидва знака позитивні, оброблювана поверхня на даній ділянці має опуклу форму, якщо негативні – увігнуту, при нульових значеннях логічної формули профіль має прямолінійну форму.

Далі з безлічі точок контуру деталі вибираються, точки, починаючи з першої один по одному, з якими послідовно сполучаються точки виробляючої поверхні інструмента з безлічі МТ, починаючи із пріоритетних. Наприклад, пріоритетна точка інструмента n (рис. 9) сполучається з деякою точкою на профілі оброблюваної поверхні M_1 , початкові координати якої (Z_1, Y_1), а потім інструмент доворачується на кут $\Delta \varphi'$, обумовлений по формулі:

$$\Delta \varphi' = S \times p_n \times \frac{z+1}{R_i \times z}, \quad (8)$$

де S – кругова подача інструмента, мм/зуб, p_n – коефіцієнт ковзання, R_i – радіус виробляючої крапки інструмента, мм, z – число оброблюваних струмків у торцевому перетині деталі.

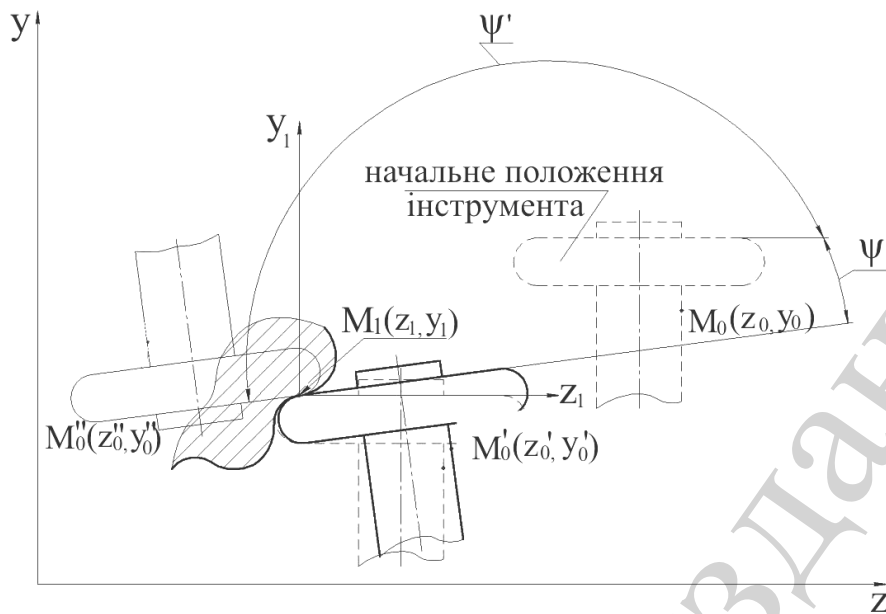


Рис. 9. Забезпечення умови торкання крапки на номінальній поверхні з обраної по пріоритету крапкою інструмента

При повороті інструмента за годинниковою стрілкою на кут $\Delta\varphi'''$, який дорівнює

$$\Delta\varphi''' = \Delta\varphi' + 180^\circ. \quad (9)$$

При повороті інструмента проти годинникової стрілки його необхідно повернути на наступні кути:

$$\Delta\varphi'' = 180^\circ - \Delta\varphi',$$

$$\Delta\varphi''' = 180^\circ + \Delta\varphi''. \quad (10)$$

Таким чином, забезпечується умова торкання інструментом оброблюваної поверхні.

Для виконання умови незарізання, визначаються нові координати крапок M_0' та M_0'' при торканні інструментом оброблюваної поверхні M_1 (рис. 9).

У якості експериментально одержуваної поверхні обраний робочий профіль матриці штамп (рис. 10), профіль якої описаний дугами окружностей різного радіуса.

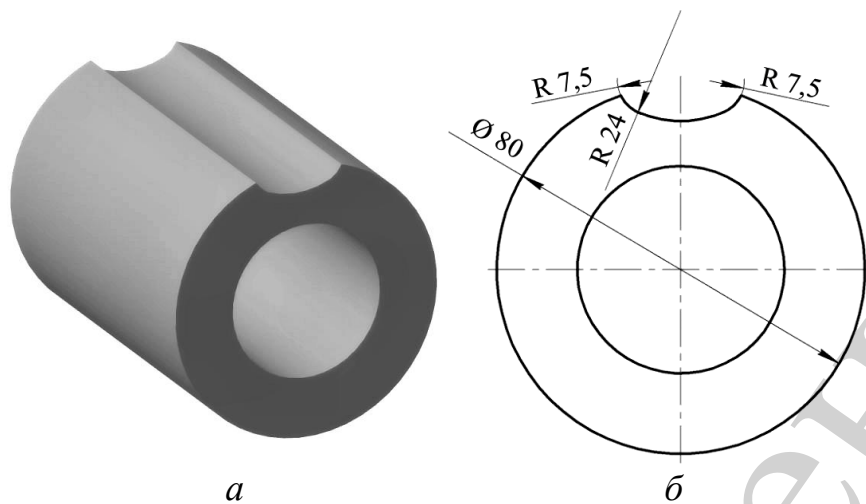


Рис. 10. Оброблюваний профіль: *а* – модель; *б* – ескіз

Для визначення таких параметрів стружки як обсяг, маса, площа поперечного перерізу, необхідних для визначення питомої продуктивності процесу обробки, скористаємося можливостями R-функцій.

4. 2. Дослідження параметрів зрізаного шару, з використанням R-функцій

Стружка виходить у результаті перетинання двох сусідніх положень фрези й заготовки (рис. 11). Елемент стружки представлений на рис. 12.

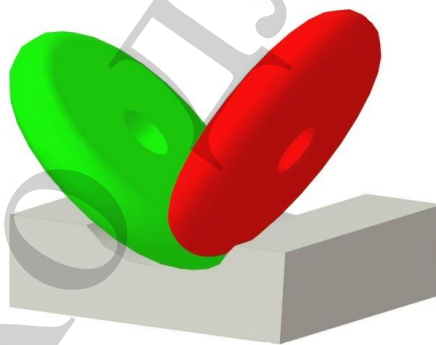


Рис. 11. Тривимірна функціональна модель утворення стружки дисковим інструментом з тороїдальною виробляючою поверхнею

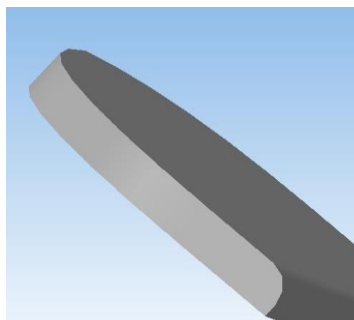


Рис. 12. Елементарний обсяг стружки

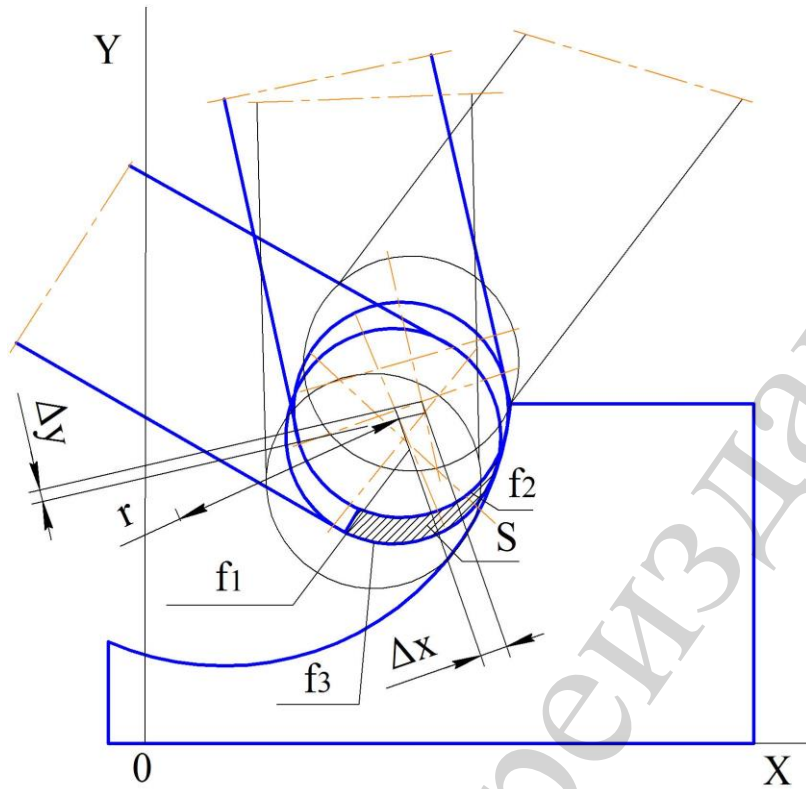


Рис. 14. Схема утворення зрізаемого шару, при фрезеруванні зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі

З рис. 13 видно, що площа шару металу, що зрізується перебуває в області, обмеженої трьома функціями f_1, f_2, f_3 .

Для розробки моделі процесу стружкоутворення фрезеруванням зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі, і визначення параметрів зрізаемого шару, використовуються алгебрологічні R-Функції В. Л. Рвачева. Із цією метою, елементарний шар металу що зрізується кожним зубом описується логічною формулою, одержуваної в результаті перетинання трьох функцій f_1, f_2, f_3 ; положень двох сусідніх зубів фрези й обробленої поверхні (рис. 13).

Для елемента стружки, зображеного на рис. 14, логічна формула має вигляд:

$$L = f_1 \wedge f_2 \wedge f_3, \quad \begin{cases} f_1 = x^2 + y^2 - R_{\Pi}^2, \\ f_2 = (x - (R_{\Pi} - r))^2 + y^2 - r^2, \\ f_3 = r^2 - (x - (R_{\Pi} - r - \Delta x))^2 - (y - \Delta y)^2, \end{cases} \quad (11)$$

де R_{Π} – радіус фрези; r – радіус ріжучої пластини; $\Delta x, \Delta y$ – зсув по осях x і y відповідно за рахунок повороту

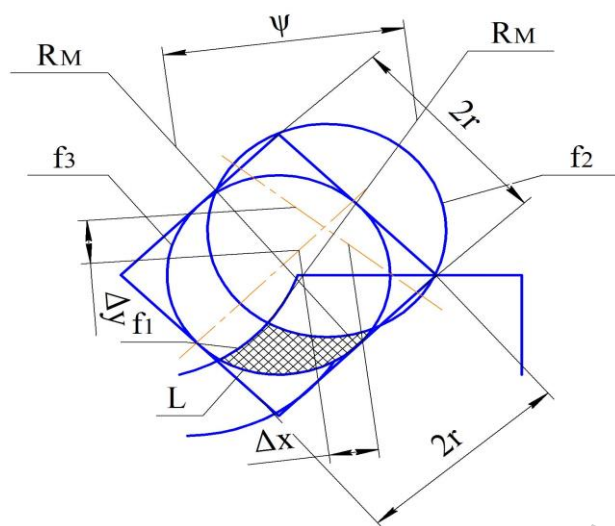


Рис. 14. Опис елемента зрізаного шару із застосуванням алгебри логіки

Обсяг знятого металу визначається з використанням методу дослідно-статистичного моделювання (метод «Монте-Карло»), який полягає в наступному. Окрема стружка формуються при накладенні двох слідів інструмента, які моделювалися багаторазово. Для цього розігрувалися за допомогою датчика випадкових чисел за законом нормального розподілу значення геометричних параметрів стружки (hстружки, bстружки й lстружки) і значення геометричних параметрів деякого куба, у який полягала стружка.

Метод «Монте-Карло» представляє спосіб визначення обсягу, за рахунок заздалегідь обраного куба відомим обсягом. Використовуємо куб

$$V = 2_r \times 2_r \times \frac{D_u}{2} \text{ (рис. 15).}$$

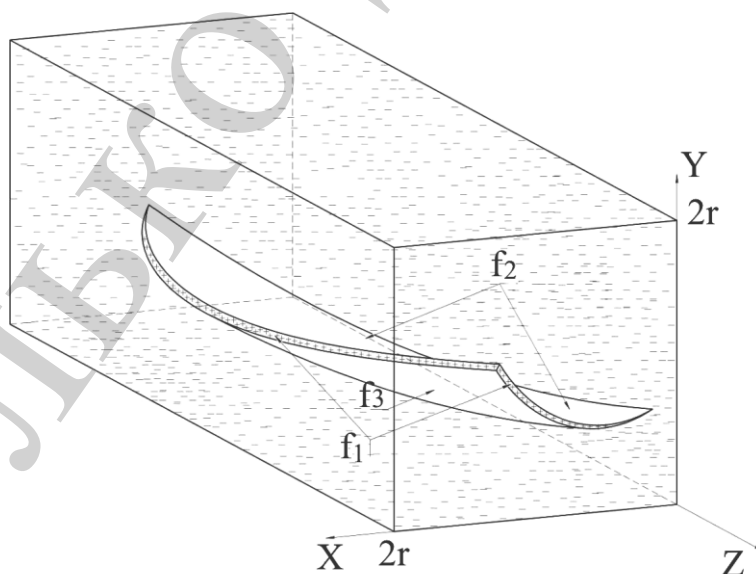


Рис. 15. Схема визначення обсягу методом «Монте-Карло»

При описі стружки R-функціями, на границі області функції ухвалюють значення 0. Усередині області значення функцій мають позитивний знак, за межами області негативний.

При підставленні довільних значень аргументів з відрізка $[0; 2r]$ для трьох координат будемо одержувати значення $L_{\text{стружки}} > 0$; $L_{\text{стружки}} < 0$ і $L_{\text{стружки}} = 0$. Підсумовуючись значення функції > 0 , ділимо їх кількість на загальне число крапок, які були використані при підрахунку. Отримане значення множимо на обсяг спочатку заданого куба одержуємо обсяг зрізаного шару матеріалу.

4. 3. Моделювання теплових потоків при обробці складопротилежних фасонних поверхонь фрезеруванням

Аналіз теплофізичної обстановки починається з розгляду теплообміну в зоні різання при роботі простим ріжучим клином, оскільки інструмент будь-якої форми й складності складається із системи простих ріжучих клинів.

Значна частина технологічних операцій протікає в умовах періодичного різання, причому періодизація процесу різання може бути обумовлена його кінематикою (у випадку фрезерування, довбання, стругання й т. п.) або переривчастістю оброблюваної поверхні (наприклад, при точінні шліцевих валів, вінців зубчастих коліс). Переривчастий процес різання дозволяє знизити температуру контактних поверхонь інструмента. Наприклад, при обробці сталі X18H10T твердосплавним інструментом із пластинами зі сталі T15K6 в області режимів $V=90 \div 270$ м/хв, $t=0,5 \div 2$ мм і $S=0,07 \div 0,25$ мм/об, температура переривчастого різання із частотою $f=1 \div 10$ Гц на 20–30 % нижче, чим у випадку безперервної роботи.

Найбільш ефективними в цей момент є способи, що поєднують у собі регулювання тривалості контакту інструмента з оброблюваним матеріалом, тобто використовувати такі способи обробки, у яких періодично виникають перерви в процесі різання.

Ефективним способом регулювання потужності тепловиділення є обробка багатолезовим інструментом (фреза) зі зворотньо-гойдаючим рухом у площині різання.

Таке переміщення реалізоване шляхом обертання робочої частини дискової фрези з радіусним профілем щодо центру профільного перетину тороїдальної поверхні. Якщо інструмент повертається навколо деякої точки ріжучої крайки із частотою n_p , то будь-яка точка, розташована на ріжучій

крайці, протягом часу $\tau_p = \frac{\mu}{\varphi \times n_p}$ буде перебувати в контакті із заготовкою, а

протягом часу $\tau_x = \frac{1}{n_p} - \tau_p$ не буде стикатися із заготовкою. Оскільки

$$\mu = \frac{180}{\pi} \sqrt{\frac{t}{2 \times r}},$$

де t – глибина різання, мм; r – радіус робочої частини інструмента, мм., тоді

$$\tau_p = \frac{1}{\pi \times n_p} \sqrt{\frac{t}{2 \times r}}.$$

Відношення

$$\frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_x} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{t}{2 \times r}}$$

характеризує ступінь нестационарності теплового процесу, а, отже, і рівень температур ріжучої частини інструмента. Чим менше це відношення, тим менше значення має середня температура на контактних поверхнях інструмента.

Зворотньо-гойдаюче переміщення робочої частини інструмента впливає на зниження температури в зоні різання. Зниження потужності тепловиділення пов'язано з пов'язане з не стаціонарністю процесу, а також тим, що тертя ковзання між інструментом і заготовкою частково замінюється тертям кочення.

Постійне переміщення ріжучої крайки приводить до зменшення роботи деформування матеріалу в зоні різання, а, отже, і до зменшення тепловиділення, еквівалентного цієї роботи. Суттєво міняється розподіл теплоти різання між заготовкою, стружкою й різцем.

Для наближеного розрахунку температури різання приймемо наступні умови:

- площадка контакту між інструментом і деталлю має дві поверхні;
- схема процесу фрезерування представлена, як взаємодія двох напів обмежених тіл, дотичних по плямі контакту розміром $b \times l$ (рис. 16).

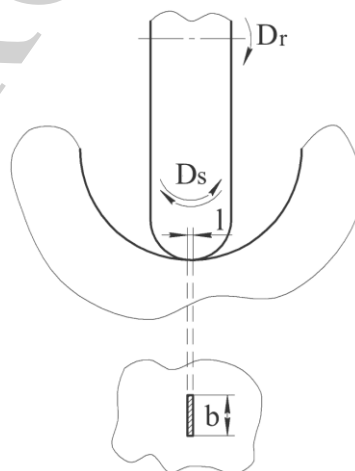


Рис. 16. Схема контакту інструмента й заготовки при фрезеруванні зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі

Середню температуру різання одержимо, використовуючи прості вираження для джерела обмеженої ширини, що рухається в півпросторі з адіабатичною граничною областю. Інтенсивність q цього джерела частиною $q_A = (l - b') \times q$ передається в деталь, а частиною $q_B = b' \times q$ – інструмент. Для інструмента, що постійно рухається, середня температура контактної поверхні, розрахованої з боку деталі, запишеться в такий спосіб:

$$\bar{\theta} = \frac{4}{3}(1 - b') \times q \frac{\sqrt{\omega \times l}}{\lambda \sqrt{\pi \times V}} K_c(u_1), \quad (12)$$

де V – швидкість головного руху; ω , λ – теплофізичні характеристики оброблюваного матеріалу.

$$u_1 = \frac{b}{l} \sqrt{Pe} = \frac{b}{l} \sqrt{\frac{V \times l}{\omega}}. \quad (13)$$

Для інструмента, що робить постійний зворотньо-гойдаючий рух, середня температура контактної поверхні:

$$\bar{\theta} = \frac{4}{3} \times b' \times q \times \frac{\sqrt{\omega_p \times b}}{\lambda_p \sqrt{\pi \times V_2}} K_c(u_2). \quad (14)$$

Прирівнюючи рівняння (12) та (14) отримуємо:

$$b' = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\lambda_p} \times \sqrt{\frac{\omega_p}{\omega}} \times \sqrt{\frac{b}{l}} \times \sqrt{\frac{V}{V_2}} \times \frac{K_c(u_2)}{K_c(u_1)}}. \quad (15)$$

Із формули (15) видно, що зі збільшенням окружної швидкості інструменту V_2 в нього надходить дедалі більша частка теплоти, що утворюється при фрезеруванні. Об'єднуючи вирази (12) і (15), а також з огляду на інтенсивність виділення тепла $q = \frac{3,9 \times P_z \times V}{b \times l}$ кал/(см²с) отримуємо формулу для наближеного визначення середньої температури площадки контакту при зворотньо-гойдаючому русі інструменту:

$$\bar{\theta} = 0,72 \times \frac{P_z \times \sqrt{V \times \omega}}{\lambda \times b \times \sqrt{l}} \times \frac{K_c(u_1)}{1 + \frac{\lambda_p}{\lambda} \times \sqrt{\frac{\omega_p}{\omega}} \times \sqrt{\frac{b}{l}} \times \sqrt{\frac{V}{V_2}} \times \frac{K_c(u_2)}{K_c(u_1)}}. \quad (16)$$

Сила P_z визначається за емпіричною залежністю:

$$P_{z\text{ срз}} = 470 \times S_z^{0,72} \times B \times z \times t_r^{0,86} / D^{0,86}. \quad (17)$$

Як видно з формули (16), вже при малих значеннях швидкості V_2 температура при зворотньо-гойдаючому русі нижче, ніж при звичайній обробці інструментом. Основною причиною зниження температури є посилений тепловідвід в тіло інструменту що гойдається (заготовки). Цей тепловідвід описується коефіцієнтом b' .

З метою перевірки отриманих закономірностей середньої температури на площадці контакту проведено моделювання процесу фрезерування зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі. Використані обчислювальні методи дозволяють розраховувати деформації матеріалу, не допускаючи викривлень кінцево-елементної сітки.

Серед різних законів поведінки матеріалу при більших деформаціях, найпоширеніший еластотеплов'язкопластичний закон Джонсона-Кука. Він ураховує адіабатичні здвигові явища, викликані більшими пластичними деформаціями й значними градієнтами температур.

Даний закон встановлює залежність напруги σ від ступеня ε (%) і швидкості деформації, а також від температури T , і може бути розкладений в мультиплікативній формі на три функції:

$$\sigma = (A + B \times \varepsilon^n) \times \left(1 + C \times \frac{\ln \varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \times \left(1 - \left[\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right]^m\right), \quad (18)$$

де σ – межа плинності; A – межа еластичності, розглянутого матеріалу; B і n відповідно лінійний і нелінійний параметр наклепу; ε – інтенсивність пластичних деформацій; C – коефіцієнт чутливості до швидкості деформації; ε_0 – коефіцієнт лінійного розширення; T_f – температура плавлення; T_0 – початкова температура.

Перший множник описує явище наклепа, другий – динамічні процеси, третій – явища відпустки.

Утворення і відділення стружки в моделі здійснюється на основі закону руйнування матеріалу. Він базується на методі «ерозії елементів», який полягає в еволюції тріщини, залежить від стану напруги деформацій в тілі оброблюваної деталі.

Застосування такого закону включає два критерії. Перший критерій характеризує необхідний ступінь руйнування матеріалу, а другий – відповідає за еволюцію тріщини, її поширення і відділення елементів один від одного.

Адаптований критерій руйнування взаємопов'язаний з законом руху Джонсона-Кука. Руйнування вважається для кожного елемента, починаючи з моменту коли:

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\varepsilon_f}, \quad (19)$$

де $\Delta \bar{\varepsilon}$ – інкремент результуючої пластичної деформації, ε_f – результуюча деформація руйнування матеріалу.

Руйнування в матеріалі починається при $\omega=1$.

Модель руйнування Джонсона-Кука враховує термомеханічні процеси при великих деформаціях. Як критерій руйнування приймається критична величина інтенсивності пластичної деформації ε_f^p . Рівняння результуючої пластичної деформації руйнування представлено у вигляді:

$$\varepsilon_f^p = \left[d_1 + d_2 \times \exp \left(d_3 \times \frac{J_1}{J_2} \right) \right] \left[1 + d_4 \times \ln \frac{\bar{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left(1 + d_5 \times \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right), \quad (20)$$

де d_i – константи матеріалу; J_1 – середня напруга; J_2 – результуюча напруга вон Мизеса; $\bar{\varepsilon}^p$ – розрахункова швидкість деформації; $\dot{\varepsilon}_0$ – межа, що характеризує момент чутливості до швидкості деформації; T_f – температура плавлення; T_0 – початкова температура.

У разі, коли критерій руйнування виконується, вступає в силу критерій розвитку руйнування. Цей критерій представляє рівень енергії G_f , необхідний для розвитку тріщини. Після виникнення тріщини, поведінку матеріалу представляють відношенням між напругою і переміщенням, а не між напругою і деформацією.

Енергія руйнування визначається за формулою:

$$G_f = \frac{K_c^2 - (1 - \nu^2)}{E}, \quad (21)$$

де K_c – стійкість руйнування; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона

Закон контакту між поверхнею ріжучого інструменту і оброблюваною поверхнею визначається сукупністю механічних і теплових явищ.

Механічні явища описуються моделлю тертя:

$$|\sigma_t| \geq \mu - |\sigma_n|, \quad |\sigma_t| < \mu - |\sigma_n|, \quad (22)$$

де σ_t , σ_n – складові вектора контактної напруги, μ – коефіцієнт тертя.

Теплові явища представлені коефіцієнтом розподілу теплового потоку, що генерується тертям. У спрощеному випадку, коли два тіла знаходяться в ідеальному контакті, відношення Вернотта може бути описано в залежності від наступного відношення фізичних характеристик двох матеріалів:

$$\frac{\Phi_{g \rightarrow 1}}{\Phi_{g \rightarrow 2}} = \frac{\sqrt{\lambda_1 - \rho_1 - C_{p1}}}{\sqrt{\lambda_2 - \rho_2 - C_{p2}}}, \quad (23)$$

де λ_1 і λ_2 – теплопровідність, ρ_1 і ρ_2 – щільність, C_{p1} і C_{p2} – питома теплопровідність ріжучого інструменту і оброблюваного матеріал відповідно.

Серед найпоширеніших програмних продуктів для моделювання процесів різання методом кінцевих елементів (Ansys, Advantedge, Deform 3D, Abaqus і ін.), ABAQUS становить інтерес із погляду відкритості програмного коду й можливості інтегрувати різні закони поведінки матеріалів і їх взаємодій.

Для моделювання процесу різання методом кінцевих елементів використовується довільний підхід Лагранжа-Ейлера.

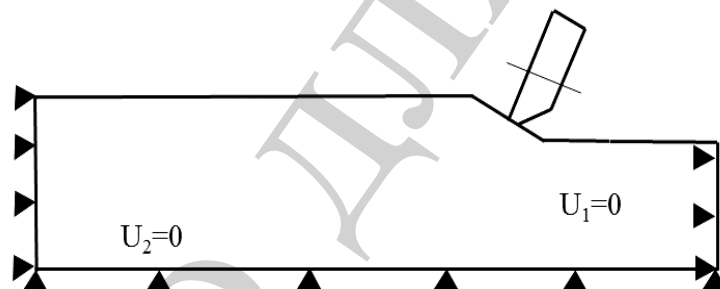


Рис. 17. Граничні умови для скінчено-елементної сітки

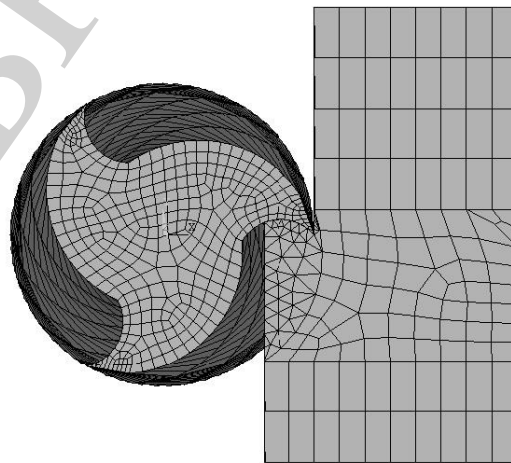


Рис. 18. Фрагмент розрахункової схеми й скінчено-елементної сітки заготовки й інструмента

На рис. 19 представлені результати досліджень температури на передній поверхні інструмента.

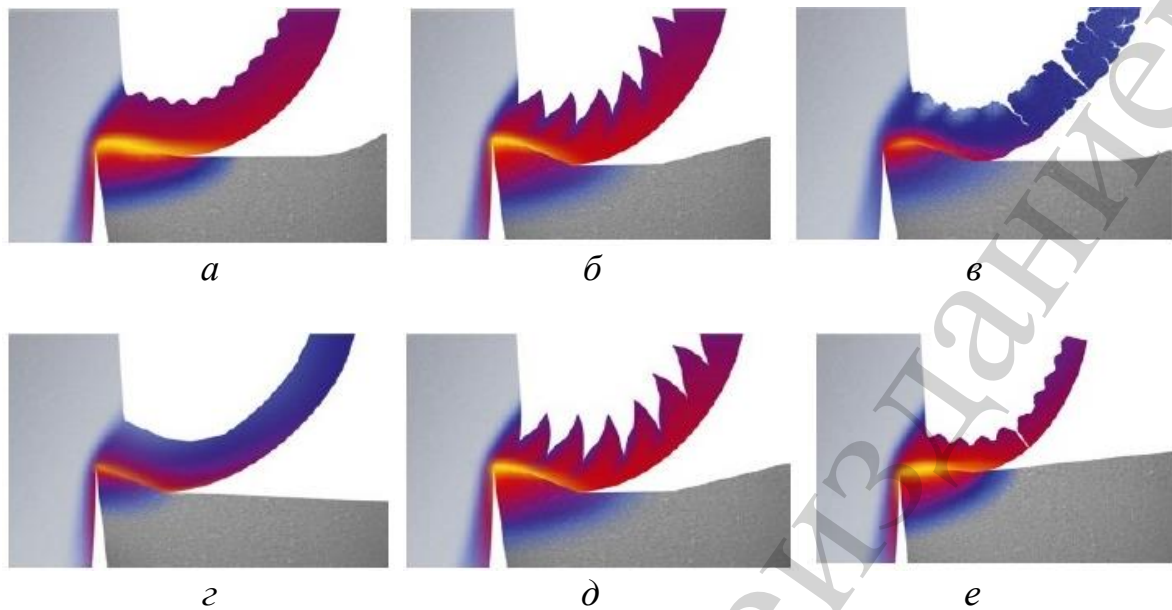


Рис. 19. Розподіл температури різання в інструменті при зміні швидкості різання V м/хв; $S_z=0,12$ мм/зуб; $V_{3\Gamma}=0,16$ м/хв; Сталь 45: $a - V=100$ м/хв; $б - V=150$ м/хв; $в - V=200$ м/хв. Сталь 9XC: $г - V=100$ м/хв; $д - V=150$ м/хв; $е - V=200$ м/хв

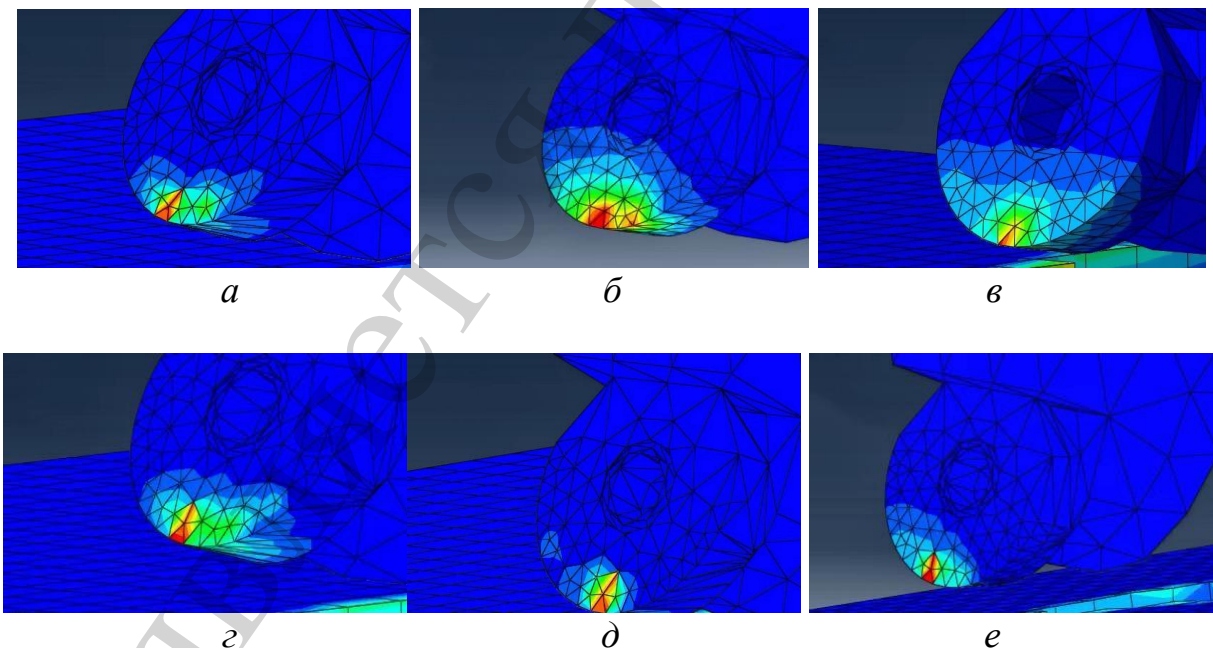


Рис. 20. Розподіл температури різання в інструменті при зміні швидкості різання V м/хв; $S_z=0,12$ мм/зуб; $V_{3\Gamma}=0,16$ м/хв; Сталь 45: $a - V=100$ м/хв; $б - V=150$ м/хв; $в - V=200$ м/хв. Сталь 9XC: $г - V=100$ м/хв; $д - V=150$ м/хв; $е - V=200$ м/хв

Моделювання методом скінчених елементів дає чітке уявлення про розподіл температури при фрезеруванні зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі. В подальшому це дозволить досліджувати зношування ріжучих крайок інструмента при даному виді фрезерування.

5. Результати досліджень процесу обробки складнопрофільних фасонних поверхонь на основі фрезерування з постійним зсувом ріжучої крайки

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що ріжуча крайка при фрезеруванні з зворотньо-гойдаючим рухом подачі прогрівається більш рівномірно, а довжина активної частини ріжучої крайки створює сприятливий для інструмента тепловідвід, що вигідно позначається на зносостійкості РІ.

Доведено, що пропонований спосіб обробки складнопрофільних фасонних поверхонь дозволяє добитися зниження температури на ріжучій крайці інструмента на 27,5–31,5 %, у порівнянні із традиційним фрезеруванням.

При аналізі характеру зносу інструменту при фрезеруванні з зворотньо-гойдаючим рухом подачі, можна зробити висновок, що знос зуба інструмента по периметру буде приблизно однаковий. За характеристику зносостійкості дискового інструменту можна прийняти знос по задній поверхні. При кожному оберті інструменту, ріжуча крайка переміщається в межах відрізка, укладеного між кутом активного контакту $\psi = \psi_1 + \psi_2$. В межах цього кута і відбувається знос ріжучої крайки. Нарешті ж частини кута повороту ділянки робочих поверхонь контактують з охолоджуючим середовищем і, природно, не зношуються. При зворотньо-гойдаючому русі подачі величина зносу, накопичена ріжучою крайкою за час T , буде визначатися за формулою

$$h_3 = L_p \times n_3 \times S_z \times h_{\text{в.з.}} \times T, \quad (15)$$

де h_3 – знос інструменту, мм; L_p – довжина шляху різання точки ріжучої крайки за один оберт фрези, мм; N_3 – частота зворотньо-гойдаючого руху подачі, хв^{-1} ; S_z – подача на зуб, мм/зуб; $h_{\text{в.з.}}$ – поверхневе відносне зношування, $\text{мкм}/10^5 \text{ мм}^2$; T – час роботи інструменту, хв.

Визначається шлях різання L_p , пройдений точкою різальної крайки фрези за час, який відповідає одному обертю інструмента.

За один поворот точка ріжучої крайки стикається зі зрізаними шаром протягом часу τ , що визначається за формулою:

$$\tau = \frac{r \times \varphi_{\text{max}}^i}{1000 \times V_{\text{BK}}}, \quad (16)$$

де r – радіус профілю інструмента, мм; φ_{\max}^i – максимальний кут контакту інструменту із заготівлею; V_{BK} – швидкість відносного зворотньо-гойдаючого руху, м/хв.

Час одного повороту визначається за формулою:

$$\tau_0 = \frac{\pi \times r \times \varphi}{180000 \times V_{BK}}, \quad (17)$$

де r – радіус профілю інструмента, мм; φ – кут, що визначає нормальні умови різання; V_{BK} – швидкість відносного зворотньо-гойдаючого руху, м/хв.

Час одного оберту інструменту визначається за формулою:

$$\tau_H = \frac{\pi \times D_\Phi}{1000 \times V_p}, \quad (18)$$

де D_Φ – діаметр інструмента, мм; V_p – швидкість різання, м/хв.

Швидкість відносного зворотньо-гойдаючого руху виражається наступним чином:

$$V_{BK} = \frac{V_p \times r \times \varphi}{180 \times D_\Phi}. \quad (19)$$

Таким чином,

$$\tau = \frac{9 \times \varphi_{\max}^i \times D_\Phi}{50 \times V_p \times \varphi}. \quad (20)$$

Шлях, пройдений точкою ріжучої крайки за один оберт інструменту протягом часу τ , визначається за формулою:

$$L_p = \tau \times V_e = \frac{9 \times \varphi_{\max}^i \times D_\Phi}{50 \times V_p \times \varphi} \times V_e, \quad (21)$$

де V_e – дійсна швидкість різання, м/хв.

Запропонована методика розрахунку зносу інструменту в процесах лезвійної обробки зі складною кінематикою дозволяє прогнозувати і визначати знос ріжучих лез, і на цій основі визначати період розмірної стійкості всього інструменту.

6. Обговорення результатів дослідження процесу фрезерування фасонних поверхонь на основі фрезерування з постійним зсувом ріжучої крайки

Отримані результати дослідження показують, що запропонований метод обробки складнопрофільних фасонних поверхонь фрезеруванням на основі фрезерування з постійним зсувом ріжучої крайки, тобто зі зворотньо-гойдаючою подачею, дозволяє підвищити період стійкості інструменту і продуктивність фрезерування, за рахунок постійного кінематичного зсуву ріжучої крайки відносно поверхні різання. Але все ж таки існують деякі складності з використанням даного методу обробки.

По-перше для реалізації даного методу обробки необхідно застосування 5-координатних обробних центрів з поворотним столом планшайбою для передачі узгодженого обертального руху заготівлі, що в значній мірі ускладнює застосування цього методу на виробництві.

По-друге треба розуміти, що є деякі особливості в складанні керуючої програми для верстату з ЧПУ, зважаючи на те, що подача в даному випадку має зворотньо-гойдаючу траєкторію.

Також слід відмітити, що при виборі геометричних елементів, що підлягають обробці, необхідно враховувати положення деталі і заготовки щодо нульової точки. Нульова точка зміщується щодо моделі, «прив'язуючи» її до окремого геометричного елемента геометричному елементу

7. Висновки

1. Технічні та технологічні рішення, що запропоновані, полягають в розробці нового високоефективного способу обробки складнопрофільних фасонних поверхонь дисковими радіусними фрезами зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі навколо центру профільного перетину тороїдальної поверхні інструменту в площині руху по оброблюваному профілю. Це дозволяє підвищити період стійкості інструменту і продуктивність фрезерування за рахунок постійного кінематичного зсуву ріжучої крайки відносно поверхні різання.

2. Розроблено математичну апарат визначення параметрів зрізаних шарів з використанням алгебри логіки (R-функцій) і ймовірносно-статистичного моделювання (метод «Монте-Карло»), що встановлює взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу і продуктивністю фрезерування зі зворотньо-гойдаючим рухом подачі.

Література

1. Петрушин С. И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: учеб. пос. Томск: Изд. ТГУ, 2003. 172 с.
2. Reliability Analysis of Car Maintenance Scheduling and Performance / Tashtoush G. M., Tashtoush K. K., Al-Muhtaseb M. A., Mayyas A. T. // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2010. Vol. 4, Issue 3. P. 388–393.
3. Радзевич С. П. Формообразование поверхностей деталей. Растан, 2001. 592 с.

4. Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Старченко О. П. Теоретичні основи оптимізації холостих переміщень інструмента при фрезеруванні складних поверхонь // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2018. № 4 (6). С. 62–70. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.062>
5. Helleno A. L., Schützer K. Investigation of tool path interpolation on the manufacturing of die and molds with HSC technology // Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 179, Issue 1-3. P. 178–184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.092>
6. Wei E.-J., Lin M.-C. Study on general analytical method for CNC machining the free-form surfaces // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 168, Issue 3. P. 408–413. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.11.009>
7. Li J. G., Yao Y. X., Wang P. Assembly accuracy prediction based on CAD model // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 78, Issue 5-8. P. 825–832. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6182-z>
8. Zhang Z., Waszink A., Wijngaard J. An instrument for measuring TQM implementation for Chinese manufacturing companies // International Journal of Quality & Reliability Management. 2000. Vol. 17, Issue 7. P. 730–755. doi: <https://doi.org/10.1108/02656710010315247>
9. Ящерицын П. И., Ефремов В. Д. Основы резания материалов: учеб. пос. Минск: БГАТУ, 2008. 644 с.
10. Шаламов В. Г., Сметанин С. Д., Гатитулин М. Н. Кинематика ротационного и традиционного резания // Известия Челябинского научного центра. 2009. Вып. 3 (45). С. 13–17.
11. Wallner J., Pottman H. On the geometry of sculptured surface machining. Nashville, 2000. P. 417–432.
12. The Vehicle Routing Problem / P. Toth, D. Vigo (Eds.). Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. 367 p. doi: <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515>
13. Pottmann H. General Offset Surfaces // Neural, Parallel & Scientific Computations. 1997. Vol. 5, Issue 1-2. P. 55–80.
14. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: учеб. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
15. Tseng Y.-J., Joshi S. Determining feasible tool-approach directions for machining Bézier curves and surfaces // Computer-Aided Design. 1991. Vol. 23, Issue 5. P. 367–379. doi: [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(91\)90030-z](https://doi.org/10.1016/0010-4485(91)90030-z)